

PENGARUH KATALIS MAGNETIK $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ TERHADAP ANALISIS TERMODINAMIKA PROSES TRANSESTERIFIKASI MINYAK KEDELAI MENJADI BIODIESEL MENGGUNAKAN VARIASI WAKTU DAN SUHU

Dimas Mariyanto¹, Ena Marlina², Akhmad Faruq Alhikami³

¹program studi Teknik mesin, universitas islam malang,
e-mail: dimasmariyanto83@gmail.com

²program studi Teknik mesin, universitas islam malang,
e-mail: ena.marlina@unisma.ac.id

³program studi Teknik mesin, universitas islam malang,
e-mail: alhikami@unisma.ac.id

Jl. MT. Haryono 193 Malang 65114, Indonesia

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan energi dan menipisnya cadangan bahan bakar fosil mendorong pengembangan energi terbarukan, salah satunya biodiesel. Produksi biodiesel melalui proses transesterifikasi dipengaruhi oleh kondisi operasi dan karakteristik katalis yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu dan waktu reaksi terhadap yield biodiesel serta menentukan karakteristik termodinamika proses transesterifikasi minyak kedelai menggunakan katalis magnetik $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan minyak kedelai sebanyak 10 g, metanol 5,87 g, dan katalis $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ sebanyak 1 g dengan variasi suhu 55°C, 60°C, dan 65°C serta waktu reaksi 45, 60, dan 120 menit. Data hasil percobaan dianalisis menggunakan model kinetika pseudo-orde pertama, persamaan Arrhenius, dan persamaan Eyring untuk menentukan konstanta laju reaksi, perubahan entalpi (ΔH), perubahan entropi (ΔS), dan energi bebas Gibbs (ΔG). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu dan waktu reaksi meningkatkan yield biodiesel, dengan kondisi optimum pada suhu 65°C selama 120 menit yang menghasilkan massa biodiesel sebesar 9,132 g atau yield 91,32%, sedangkan kondisi terendah diperoleh pada suhu 55°C selama 45 menit dengan massa biodiesel sebesar 7,846 g atau yield 78,46%. Analisis termodinamika menunjukkan nilai ΔH sebesar 62,538 kJ mol⁻¹, ΔS sebesar -0,103 kJ mol⁻¹ K⁻¹, dan ΔG sebesar 96,239; 96,752; dan 97,266 kJ mol⁻¹ pada suhu 328,15 K, 333,15 K, dan 338,15 K. Nilai ΔH yang positif menunjukkan bahwa reaksi bersifat endotermik, sedangkan nilai ΔS yang negatif menunjukkan terbentuknya keadaan transisi yang lebih teratur. Nilai ΔG yang positif mengindikasikan bahwa reaksi transesterifikasi tidak berlangsung secara spontan dan memerlukan suplai energi dari luar untuk membentuk kompleks teraktivasi. Selain itu, nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9979 menunjukkan bahwa model kinetika yang digunakan memiliki kesesuaian yang sangat baik terhadap data eksperimen. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa katalis magnetik $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ memiliki potensi yang baik dalam meningkatkan produksi biodiesel dari minyak kedelai serta memberikan informasi mengenai karakteristik termodinamika yang dapat digunakan sebagai dasar dalam pengembangan proses transesterifikasi yang lebih efisien.

Kata kunci: Biodiesel, transesterifikasi, minyak kedelai, katalis magnetik $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$, termodinamika, kinetika reaksi.

ABSTRACT

The increasing demand for energy and the depletion of fossil fuel reserves have encouraged the development of renewable energy sources, one of which is biodiesel. Biodiesel production through the transesterification process is influenced by operating conditions and the characteristics of the catalyst used. This study aimed to analyze the effect of reaction temperature and reaction time on biodiesel yield and to determine the

thermodynamic characteristics of the transesterification of soybean oil using a magnetic $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ catalyst. The research was conducted experimentally using 10 g of soybean oil, 5.87 g of methanol, and 1 g of $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ catalyst with reaction temperatures of 55°C, 60°C, and 65°C and reaction times of 45, 60, and 120 minutes. The experimental data were analyzed using the pseudo-first-order kinetic model, the Arrhenius equation, and the Eyring equation to determine the reaction rate constant, enthalpy change (ΔH), entropy change (ΔS), and Gibbs free energy change (ΔG). The results showed that increasing the reaction temperature and time improved the biodiesel yield. The optimum condition was achieved at 65°C for 120 minutes, producing 9.132 g of biodiesel with a yield of 91.32%, while the lowest result was obtained at 55°C for 45 minutes, producing 7.846 g of biodiesel with a yield of 78.46%. Thermodynamic analysis revealed an enthalpy change (ΔH) of 62.538 kJ mol⁻¹, an entropy change (ΔS) of -0.103 kJ mol⁻¹ K⁻¹, and Gibbs free energy (ΔG) values of 96.239, 96.752, and 97.266 kJ mol⁻¹ at temperatures of 328.15 K, 333.15 K, and 338.15 K, respectively. The positive ΔH value indicates that the transesterification reaction is endothermic, while the negative ΔS value suggests the formation of a more ordered transition state. The positive ΔG values indicate that the reaction is non-spontaneous and requires external energy to form the activated complex. Furthermore, the coefficient of determination (R^2) of 0.9979 demonstrates that the applied kinetic model exhibits excellent agreement with the experimental data. These findings indicate that the magnetic $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ catalyst has significant potential for enhancing biodiesel production from soybean oil while providing valuable thermodynamic insights that can serve as a basis for developing a more efficient transesterification process.

Keywords: Biodiesel, transesterification, soybean oil, magnetic $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ catalyst, thermodynamics, reaction kinetics.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi dunia yang terus meningkat akibat pertumbuhan penduduk dan perkembangan sektor industri, serta semakin berkurangnya ketersediaan bahan bakar fosil dan dampak negatifnya terhadap lingkungan seperti emisi gas rumah kaca dan perubahan iklim [4]. Biodiesel mempunyai kelebihan yaitu angka setana dan nyala api yang tinggi serta karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan rendah dan tidak mengandung sulfur [6]. Gas-gas tersebut mayoritas berupa gas karbondioksida (CO_2) dan metana (CH_4) yang mengakibatkan terjadinya fluktuasi curah hujan tinggi dan kenaikan muka air laut pada lapisan atmosfer paling bawah. Pemerintah Indonesia sejatinya telah meluncurkan kebijakan untuk menangani perubahan iklim, termasuk komitmen emisi nol (*Net Zero Emissions*) pada 2060 [6].

Transesterifikasi merupakan proses kimia reaksi antara trigliserida yang terkandung dalam minyak nabati atau lemak hewani dengan alkohol rantai pendek, seperti metanol atau etanol, sehingga menghasilkan *Fatty Acid Alkyl Esters* (FAAE) atau

biodiesel dan gliserol sebagai produk samping. Produksi biodiesel masih menghadapi beberapa kendala, antara lain efisiensi reaksi yang belum maksimal dan biaya produksi yang cukup tinggi, terutama akibat penggunaan katalis homogen yang menimbulkan kesulitan dalam proses pemisahan serta menghasilkan limbah [8].

Katalis merupakan zat yang dapat meningkatkan laju reaksi kimia dengan menurunkan energi aktivasi melalui penyediaan jalur reaksi alternatif tanpa mengalami perubahan permanen pada akhir reaksi. Penggunaan katalis dapat meningkatkan efisiensi proses, mempercepat pembentukan produk, serta mengurangi kebutuhan energi reaksi. Dalam produksi biodiesel, katalis digunakan untuk mempercepat reaksi transesterifikasi antara trigliserida dan alkohol sehingga diperoleh konversi biodiesel yang lebih tinggi dalam waktu yang lebih singkat [9]. Katalis homogen seperti NaOH, KOH, H_2SO_4 , dan HCl banyak digunakan dalam proses transesterifikasi biodiesel karena memiliki aktivitas katalitik yang tinggi. Katalis homogen memiliki beberapa kelemahan, seperti bersifat korosif, sulit

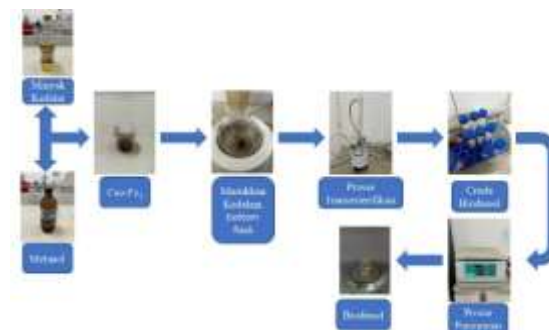
dipisahkan dari produk, tidak dapat digunakan kembali, serta menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar selama proses pemurnian biodiesel [3]. Untuk mengatasi kesulitan pemisahan katalis CaO setelah reaksi, Fe_3O_4 digunakan sebagai penyangga magnetik sehingga katalis dapat dipisahkan dengan mudah menggunakan medan magnet. Katalis $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ yang dihasilkan tersusun atas fase $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$, dan CaFe_2O_6 serta menunjukkan aktivitas yang baik dalam produksi biodiesel [1].

Pemahaman mengenai aspek termodinamika reaksi menjadi sangat penting karena dapat menjelaskan kelayakan, spontanitas, dan kebutuhan energi selama proses berlangsung. Parameter termodinamika seperti energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS) memberikan informasi mengenai arah reaksi, karakteristik endotermik atau eksotermik, serta perubahan keteraturan sistem selama proses transesterifikasi [5]. Kajian termodinamika pada proses produksi biodiesel perlu dilakukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai perilaku reaksi dan menentukan kondisi operasi yang optimal bagi pengembangan teknologi biodiesel yang efisien dan berkelanjutan.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperluas wawasan dalam bidang teknik energi dan termodinamika pembakaran, pada kajian komparatif parameter kinetika dan termodinamika aktivasi transesterifikasi biodiesel menggunakan katalis $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ pada rentang suhu (55°C , 60°C , 65°C), yang lebih representatif terhadap kondisi operasi transesterifikasi heterogen dibandingkan studi sebelumnya yang umumnya dilakukan pada suhu tinggi. Penelitian ini mengintegrasikan analisis konstanta laju reaksi, energi aktivasi, entalpi aktivasi, entropi aktivasi, dan energi bebas Gibbs aktivasi untuk mengevaluasi pengaruh modifikasi katalis berbasis $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ terhadap kebutuhan energi dan mekanisme reaksi. Selain itu, penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan antara variasi suhu dan karakteristik katalis terhadap perilaku kinetika dan termodinamika transesterifikasi biodiesel, yang masih jarang dilaporkan dalam literatur. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan teknologi energi berkelanjutan di Indonesia serta memperkuat upaya transisi menuju sistem energi terbarukan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk mengkaji kinetika dan termodinamika aktivasi pada proses transesterifikasi minyak kedelai menjadi biodiesel menggunakan katalis komposit magnetik $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$. Proses transesterifikasi dilakukan dengan mereaksikan minyak kedelai dan metanol pada suhu operasi (55°C , 60°C , dan 65°C). Pengambilan data dilakukan pada beberapa waktu reaksi, yaitu (45, 60, dan 120 menit).



Gambar 1. Skema Instalasi Penelitian

Metode Analisis

Metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah perhitungan persentase yield biodiesel dan parameter termodinamika. Pada penelitian ini proses transesterifikasi dievaluasi melalui perhitungan yield biodiesel, menurut penelitian dari [2] nilai yield menunjukkan efisiensi konversi minyak menjadi biodiesel yang dihitung menggunakan persamaan (1):

$$\text{Yield FAME (\%)} = \frac{\text{Berat}_{\text{FAME}}}{\text{Berat}_{\text{Minyak Kedelai}}} \times 100 \quad (1)$$

Transesterifikasi diperkirakan mengikuti kinetika pseudo orde pertama karena penggunaan metanol dalam jumlah berlebih memungkinkan reaksi balik diabaikan (dianggap konstan). Dengan demikian, laju reaksi (r) dapat dinyatakan dengan persamaan.

$$r = -\frac{d[O]}{dt} = k[O]$$

Di sini (k) adalah konstanta laju, $[O]$ adalah konsentrasi minyak kedelai dan (t) adalah waktu

reaksi. Konstanta laju orde pertama ditetapkan dengan memeriksa konversi minyak menjadi metil ester pada waktu (t) dalam Persamaan (2). Konstanta laju pada berbagai suhu kemudian digunakan dalam persamaan *Arrhenius* (Persamaan (3)) untuk menghitung energi aktivasi (E_a) untuk reaksi transesterifikasi.

$$-\ln(1 - X) = kt \quad (2)$$

$$\ln k = -\frac{E_a}{RT} + \ln P \quad (3)$$

Energi aktivasi dapat dihitung dari nilai slope.

$$E_a = -(\text{slope}) \times R$$

Persamaan energi bebas Gibbs (Persamaan (4)) dan persamaan Eyring-Polanyi (Persamaan (5)) digunakan untuk memperkirakan sifat termodinamika dari transesterifikasi minyak kedel dan katalis CaO-Fe₃ pada berbagai suhu. Perubahan entalpi (ΔH°), entropi (ΔS°), dan energi bebas Gibbs (ΔG°) ditentukan di sini.

$$\ln\left(\frac{k}{T}\right) = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} + \ln\left(\frac{k_b}{h}\right) \quad (4)$$

Persamaan ini digunakan untuk menentukan parameter aktivasi termodinamika, yaitu:

- ΔH° = entalpi aktivasi (kJ mol^{-1})
- ΔS° = entropi aktivasi ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- ΔG° = energi bebas Gibbs aktivasi (kJ mol^{-1})

Dari grafik $\ln(k/T)$ terhadap $1/T$, diperoleh:

$$\Delta H^\circ = -(\text{slope}) R$$

Dan

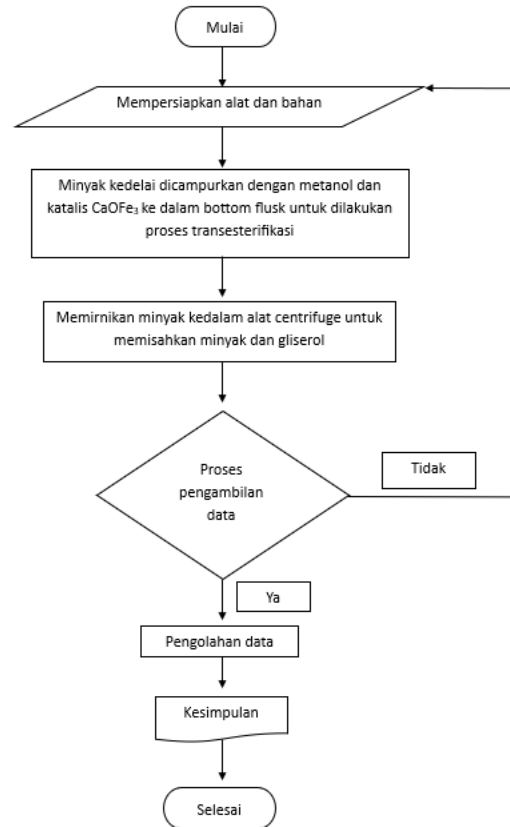
$$\Delta S^\circ = R \left[\text{intercept} - \ln\left(\frac{k_b}{h}\right) \right]$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (5)$$

Persamaan Eyring sering digunakan setelah analisis Arrhenius untuk mengkaji parameter termodinamika aktivasi reaksi transesterifikasi atau esterifikasi, sehingga dapat diketahui:

- kebutuhan energi pembentukan keadaan transisi (ΔH°),
- tingkat keteraturan sistem selama reaksi (ΔS°),
- spontanitas pembentukan kompleks teraktivasi melalui (ΔG°).

DIAGRAM ALIR PENELITIAN



HASIL DAN PEMBAHASAN

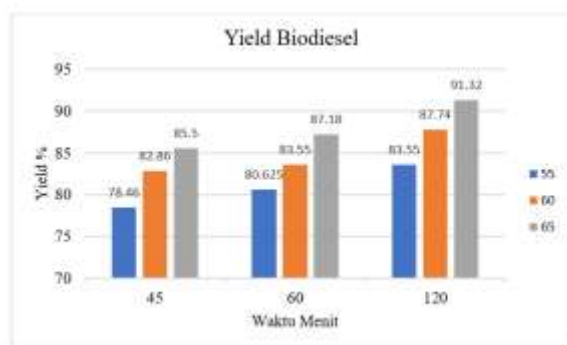
1. Yield Biodiesel

Tabel 1. Data Perhitungan Yield Biodiesel

Suhu (C°)	Waktu (m)	Massa Biodiesel	Massa Awal (g)
--------------	--------------	--------------------	----------------------

Minyak (g)			10
55	45	7.846	
55	60	8.062	
55	120	8.355	
60	45	8.286	
60	60	8.355	
60	120	8.774	
65	45	8.550	
65	60	8.718	
65	120	9.132	

Persentase hasil FAME yang disintesis dihitung menggunakan Persamaan (1). Diketahui bahwa variasi suhu dan waktu reaksi memberikan pengaruh terhadap massa biodiesel yang dihasilkan dari proses transesterifikasi minyak kedelai menggunakan katalis magnetik $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$. Massa awal minyak kedelai yang digunakan pada setiap percobaan dijaga konstan sebesar 10 gram, sehingga perubahan massa biodiesel yang diperoleh dapat menggambarkan tingkat keberhasilan proses konversi trigliserida menjadi metil ester. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu dan waktu reaksi menyebabkan massa biodiesel yang dihasilkan semakin besar. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan kedua parameter tersebut mampu meningkatkan efektivitas reaksi transesterifikasi.



Gambar 2. Grafik pengaruh variasi suhu dan waktu terhadap yield biodiesel

Massa biodiesel meningkat dari 7,846gram pada kondisi 55°C selama 45 menit menjadi 9,132gram pada kondisi 65°C selama 120 menit atau mengalami peningkatan sekitar 16,4%. Hasil tersebut

menunjukkan bahwa suhu dan waktu reaksi merupakan parameter yang sangat berpengaruh terhadap keberhasilan proses transesterifikasi. Peningkatan suhu mempercepat laju reaksi, sedangkan waktu reaksi yang lebih lama memungkinkan konversi trigliserida berlangsung lebih sempurna sehingga jumlah biodiesel yang dihasilkan semakin besar. Suhu yang terlalu tinggi melebihi titik didih metanol dapat menyebabkan penguapan metanol dan menurunkan efisiensi reaksi apabila tidak menggunakan sistem *refluks*. Pemilihan suhu dan waktu reaksi yang optimum menjadi faktor penting untuk memperoleh hasil biodiesel yang maksimal.

2. Termodinamika Reaksi Transesterifikasi Katalis $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$

Hasil perhitungan parameter termodinamika diperoleh berdasarkan data konstanta kesetimbangan pada berbagai temperatur reaksi dan selanjutnya dianalisis menggunakan pendekatan persamaan pseudo orde pertama. Nilai-nilai ΔH , ΔS , dan ΔG yang diperoleh kemudian digunakan untuk menginterpretasikan karakteristik reaksi transesterifikasi minyak kedelai menjadi biodiesel.

Tabel 2. Parameter termodinamika untuk transesterifikasi minyak kedelai menggunakan katalis $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$

Katalis	T(k)	$\Delta G^\circ \text{ kJ mol}^{-1}$	$\Delta H^\circ \text{ kJ mol}^{-1}$	$\Delta S^\circ \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	R^2
$\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$	328.15	96.239	62.538	-0.103	0.9979
	333.15	96.752			
	338.15	97.266			

Hasil termodinamika menunjukkan bahwa reaksi transesterifikasi minyak kedelai menggunakan katalis $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ tergolong reaksi endotermik ($\Delta H > 0$) dengan penurunan entropi ($\Delta S < 0$) seperti yang tertera pada Tabel 2.2. Kombinasi kedua parameter tersebut menyebabkan nilai energi bebas Gibbs (ΔG) tetap positif pada seluruh suhu pengamatan (55, 60, 65°C), sehingga secara termodinamika reaksi diklasifikasikan sebagai reaksi yang tidak spontan. Proses produksi biodiesel memerlukan pemberian

energi panas dari luar serta bantuan katalis untuk mempercepat laju reaksi sehingga konversi biodiesel dapat berlangsung secara efektif.



Gambar 3. Grafik Hubungan Energi Bebas Gibbs (ΔG) terhadap Suhu Reaksi

Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa nilai energi bebas Gibbs (ΔG) mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan suhu reaksi dari 55 °C hingga 65 °C. Nilai ΔG meningkat dari sekitar 96,23 kJ/mol menjadi 97,27 kJ/mol dengan hubungan linier yang ditunjukkan oleh persamaan regresi $y = 0,1027x + 90,59$ dan koefisien determinasi $R^2 = 1$. Nilai R^2 yang mendekati satu menunjukkan bahwa perubahan suhu memiliki hubungan linier yang sangat kuat terhadap perubahan energi bebas Gibbs pada rentang suhu yang diteliti.

3. Perbandingan Termodinamika Reaksi Katalis Heterogen

Perbandingan parameter termodinamika antar berbagai katalis heterogen merupakan salah satu pendekatan yang penting untuk menilai efektivitas suatu katalis dalam proses transesterifikasi. Nilai entalpi (ΔH), entropi (ΔS), dan energi bebas Gibbs (ΔG) yang diperoleh pada penelitian ini dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya. Analisis tersebut diharapkan dapat menunjukkan posisi kinerja katalis magnetik $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ terhadap katalis heterogen lainnya serta menjelaskan pengaruhnya terhadap

aspek energetika dan spontanitas reaksi pembentukan biodiesel.

Tabel 3. Perbandingan parameter termodinamika untuk proses transesterifikasi bio-oil dengan metanol.

No	Minyak	Katalis	ΔH° kJ mol ⁻¹	ΔS° J mol ⁻¹ K ⁻¹	Referensi
1	Minyak Kedelai	$\text{CaO-F e}_3\text{O}_4$	62.538	-103	Pribadi
2	Minyak Kedelai	$\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ NCs catalyst	39.1	-148.4	(Ao et al., 2024)
3	Minyak Sawit	enzim lipase terimobilisasi	2,276	21,71	(Pogaku et al., 2012)
4	Minyak Bunga Matahari	nanokatalis Al-Sr (aluminium-stronsium)	215.02	662.70	(Feyzi & Shahbazi, 2017)
5	Minyak Kedelai	NaOH	28.33	-180	(Wu et al., 2016)

Hasil perbandingan parameter termodinamika menunjukkan bahwa karakteristik energi reaksi transesterifikasi dipengaruhi oleh jenis minyak, katalis, dan kondisi operasi. Pada penelitian ini, transesterifikasi minyak kedelai menggunakan katalis $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ menghasilkan nilai ΔH° sebesar 62,538 kJ mol⁻¹ dan ΔS° sebesar -0,103 J mol⁻¹ K⁻¹. Nilai ΔH° yang positif mengindikasikan bahwa reaksi bersifat endotermik, sedangkan nilai ΔS° yang negatif menunjukkan sedikit penurunan ketidakteraturan sistem selama pembentukan kompleks teraktivasi.

Dibandingkan dengan penelitian oleh Ao et al. (2024), nanokomposit $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ memiliki nilai ΔH° yang lebih rendah (39,1 kJ mol⁻¹), yang menunjukkan kebutuhan energi aktivasi yang lebih kecil. Perbedaan tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh karakteristik katalis, seperti luas permukaan, ukuran partikel, distribusi situs aktif, serta perbedaan kondisi reaksi. Sebaliknya, nanokatalis Al-Sr pada minyak bunga matahari menunjukkan nilai ΔH° (215,02 kJ mol⁻¹)

dan ΔS° ($662,70 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) yang jauh lebih tinggi, sedangkan sistem lipase terimobilisasi pada minyak sawit memiliki ΔH° yang lebih rendah dengan ΔS° positif, mencerminkan mekanisme katalisis yang berbeda.

Secara keseluruhan, variasi nilai ΔH° dan ΔS° menunjukkan bahwa parameter termodinamika transesterifikasi dipengaruhi oleh komposisi bahan baku, karakteristik katalis, dan kondisi proses. Meskipun nilai ΔH° pada penelitian ini lebih tinggi dibandingkan nanokomposit $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$, nilainya masih lebih rendah daripada nanokatalis Al-Sr , sehingga menunjukkan bahwa katalis $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ memiliki karakteristik termodinamika yang baik dan berpotensi untuk diaplikasikan dalam sintesis biodiesel dari minyak kedelai.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai transesterifikasi minyak kedelai menjadi biodiesel menggunakan katalis magnetik $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi suhu dan waktu reaksi berpengaruh signifikan terhadap yield biodiesel. Peningkatan suhu dari 55°C menjadi 65°C dan waktu reaksi dari 45 menjadi 120 menit meningkatkan yield biodiesel hingga mencapai kondisi optimum pada 65°C selama 120 menit, dengan massa biodiesel 9,132 g dan yield 91,32%. Kondisi terendah diperoleh pada 55°C selama 45 menit dengan massa biodiesel 7,846 g dan yield 78,46%. Peningkatan yield tersebut menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi meningkatkan energi kinetik molekul dan frekuensi tumbukan efektif, sedangkan waktu reaksi yang lebih lama mendorong konversi trigliserida menjadi biodiesel secara lebih optimal.
2. Hasil analisis termodinamika menunjukkan bahwa reaksi transesterifikasi memiliki nilai ΔH sebesar $62,538 \text{ kJ mol}^{-1}$, ΔS sebesar $-0,103 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, dan ΔG berturut-turut sebesar 96,239, 96,752, dan $97,266 \text{ kJ mol}^{-1}$ pada suhu 55, 60, dan 65°C . Nilai ΔH yang positif menunjukkan bahwa reaksi bersifat endotermik, sedangkan nilai ΔS yang negatif mengindikasikan terjadinya penurunan tingkat ketidakteraturan selama

pembentukan kompleks teraktivasi. Nilai ΔG yang tetap positif pada seluruh suhu pengamatan menunjukkan bahwa reaksi tidak berlangsung secara spontan sehingga memerlukan suplai energi panas dari luar serta bantuan katalis untuk mempercepat proses transesterifikasi.

3. Perbandingan dengan beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa parameter termodinamika sangat dipengaruhi oleh jenis minyak, karakteristik katalis, metode sintesis katalis, serta kondisi operasi reaksi. Nilai ΔH pada penelitian ini lebih tinggi dibandingkan katalis nanokomposit $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$, nilainya masih lebih rendah dibandingkan nanokatalis Al-Sr . Hal tersebut menunjukkan bahwa katalis magnetik $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ memiliki karakteristik termodinamika yang kompetitif dan berpotensi untuk diaplikasikan dalam produksi biodiesel dari minyak kedelai.

SARAN

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan optimasi parameter proses yang lebih luas, meliputi rasio molar metanol terhadap minyak, jumlah katalis, kecepatan pengadukan, serta rentang suhu reaksi yang lebih beragam guna memperoleh kondisi optimum produksi biodiesel. Selain itu, perlu dilakukan pengujian penggunaan ulang (reusability) katalis magnetik $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ untuk mengevaluasi stabilitas dan aktivitas katalitiknya, serta pengujian kualitas biodiesel sesuai SNI 7182:2015. Kajian kinetika dan termodinamika pada rentang suhu yang lebih luas serta perbandingan dengan berbagai katalis heterogen magnetik juga diperlukan untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme reaksi dan efisiensi proses transesterifikasi. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ali, M. A., Al-Hydary, I. A., & Al-Hattab, T. A. (2017). Nano-magnetic catalyst $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ for biodiesel production from date palm seed oil. In *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis* (Vol. 12, Number 3, pp. 460–468). Diponegoro University. <https://doi.org/10.9767/bcrec.12.3.923.460-468>
- [2] Ao, S., Greer, H. F., Alghamdi, L. A., Rashid, U.,

- Halder, G., Wheatley, A. E. H., & Rokhum, S. L. (2024a). Snail shell derived magnetic nanocatalysts for biodiesel production: Process optimization through response surface methodology, kinetics, and thermodynamic studies. *Biomass and Bioenergy*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107442>
- [3] Changmai, B., Vanlalveni, C., Ingle, A. P., Bhagat, R., & Rokhum, L. (2020). Widely used catalysts in biodiesel production: A review. In *RSC Advances* (Vol. 10, Number 68, pp. 41625–41679). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d0ra07931f>
- [4] Chukwuemeke Ulakpa, W., Sarafa Azeez, O., Aderemi Olutoye, M., & Egwunwu Dim, P. (2025). Kinetics and Thermodynamics Studies of Biodiesel Synthesis From Castor Oil Using Calcium Oxide Doped Titanium (IV) Oxide Nanocatalyst. *NIPES - Journal of Science and Technology Research*, 7(3), 403–422. <https://doi.org/10.37933/nipes/7.3.2025.1365>
- [5] Feyzi, M., & Shahbazi, Z. (2017a). Preparation, kinetic and thermodynamic studies of Al–Sr nanocatalysts for biodiesel production. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 71, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.11.023>
- [6] Hartato, C. Y., Marlina, E., & Robbi, N. (2023). Penambahan persentase daun pepaya sebagai katalis heterogen terhadap kualitas biodiesel minyak kedelai dengan metode transesterifikasi. *Jurnal Teknik Mesin*, 20(1), 48.
- [7] Musdalipa, Salma Destia Ratna, & Ilham Dwi Rafiqi. (2026). 7.+Climate+Change+Regulatory+Assessment-. (2012). Evaluation of Activation Energy and Thermodynamic Properties of Enzyme-Catalysed Transesterification Reactions. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 02(01), 150–154. <https://doi.org/10.4236/aces.2012.21018>
- [9] Rahmawati, S., Wahyuni, S., & Putra Moestiono, F. (2025). Green composite Fe₃O₄/CaO (0.5 g) for biodiesel production with preliminary structural, functional and morphological characterization. *Journal of Physics: Theories and Applications J. Phys.: Theor. Appl*, 9(2), 212–222. <https://doi.org/10.20961/jphystheor-appl.v9i2.108611>
- [10] Sagadevan, S., & Fatimah, I. (2024). Current Advanced Technologies in Catalysts/Catalyzed Reactions. In *Catalysts* (Vol. 14, Number 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/catal14030177>
- [11] Wu, L., Wei, T., Lin, Z., Zou, Y., Tong, Z., & Sun, J. (2016). Bentonite-enhanced biodiesel production by NaOH-catalyzed transesterification: Process optimization and kinetics and thermodynamic analysis. *Fuel*, 182, 920–927. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.065>